

# MEROUTE: UN MÉTODO MULTIATRIBUTO PARA EL RUTEO DE VEHÍCULOS

Rosario Garza Ríos<sup>1</sup> y Caridad González Sánchez<sup>2</sup>, Dpto. Matemática Aplicada, Facultad de Ingeniería Industrial, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE)

## RESUMEN

La planificación de rutas de distribución es uno de los principales problemas con que se enfrentan diariamente las empresas distribuidoras. Los enfoques desarrollados hasta el momento para resolver este problema no consideran el carácter multiobjetivo que se desprende del mismo: satisfacción del cliente con el mínimo costo. En el presente trabajo se expone un método desarrollado por los autores, basado en los conocidos métodos ELECTRE de la escuela europea de la decisión, el cual es un primer intento en Cuba de acometer el problema con técnicas multiatributo, el mismo brinda una respuesta flexible y eficaz para el diseño de rutas de distribución.

## ABSTRACT

The planning of distribution routes is one of the main problems commonly faced by the distribution enterprise. Updated developed approach to solve this problem do not take into account their multiobjective character: the client's satisfaction with minimum cost. A new method, based on the well known ELECTRE from the European school of decision making is presented by the authors. This is the first Cuban attempt for solving this problem by using multiattributte techniques. This method shows a flexible and effective answer for designing distribution routes.

**Key words:** route, multicriterio, decision.

MSC: 90B06

## 1. INTRODUCCIÓN

Lograr hacer la distribución de bienes o servicios lo más eficiente y flexible posible, es hoy un objetivo fundamental de cualquier empresa productora-distribuidora. Entiéndase por eficiente, llegar al cliente con **la calidad requerida, en el tiempo fijado y al menor costo**. Un rol importante para obtener esto lo juega las actividades de transporte y dentro de estas la fundamental a desarrollar es **la planificación de rutas de distribución**.

Hasta ahora, el problema ha sido resuelto con enfoque poco flexible, considerando un criterio de optimización (generalmente la distancia recorrida por el sistema de distribución), y asignando restricciones a la satisfacción de los clientes y a las normas de explotación de los vehículos. Sin embargo, en condiciones de limitaciones de recursos, cuando los principios de Calidad Total no pueden ser absolutizados, se requiere la aplicación de otros enfoques. Probablemente, la modelación multicriterio aporta la flexibilidad necesaria para la máxima satisfacción del cliente, con la mayor eficiencia posible, y en el marco de los recursos disponibles.

En presencia de múltiples criterios (**satisfacción del cliente y costo**) una respuesta a la pregunta sobre **la mejor solución** no se obtiene directamente como en el caso de un solo criterio. Para cada caso particular debemos construir un modelo global de preferencias del Decision Marker (DM) el cual podrá ser aplicado para obtener la mejor solución.

En el presente trabajo se propone un método multicriterio para el problema de rutas, que intenta lograr el mayor compromiso entre atributos en conflicto, maximizando la cantidad de clientes satisfechos y minimizando el costo total de distribución. En el procedimiento se considera el carácter relativo de la acción de satisfacer un cliente, modelando umbrales de indiferencia y preferencias, condiciones de veto asociado a la violación de los requerimientos de horarios, utilizando como base la filosofía de los métodos ELECTRE.

En el epígrafe I del trabajo se discute el problema a resolver así como los fundamentos del método seleccionado para darle solución y sobre esa base se expone un procedimiento desarrollado por los autores para la solución de dicho problema con este enfoque (epígrafe II).

---

E-mail: <sup>1</sup>rosariog@ind.ispjae.edu.cu  
<sup>2</sup>caryg@ind.ispjae.edu.cu

## 2. EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Los problemas de ruteo tienen un impacto relevante en los costos de transporte y el nivel de servicio al cliente.

Existen tres tipos básicos de problemas de ruteo:

- Definir rutas de transporte entre varios orígenes y varios destinos (problema de transporte).
- Encontrar una ruta donde el origen es diferente al destino (planificación física) (López, 1998).
- Encontrar las rutas a seguir por los vehículos cuando el origen y el destino son los mismos.

En el presente trabajo haremos referencia al tercer tipo de problema, por ser el que más se presenta en la vida cotidiana.

Este problema abarca dos grandes grupos:

- Problema del agente viajero (TSP): consiste en encontrar la secuencia de puntos a visitar por un viajero comenzando por el origen y terminando en él, minimizando la distancia o tiempo recorrido.
- Problema de ruteo de vehículos: un número de vehículos con capacidad limitada debe servir un conjunto determinado de consumidores con ciertas demandas y satisfacer un número finito de restricciones. El objetivo es definir la secuencia de visitas para minimizar costos, distancias o tiempos.

El problema de ruteo de vehículos con el mismo origen y destino tiene los siguientes parámetros básicos:

K: número de vehículos

n: número de clientes a servir

b: capacidad de cada vehículo (volumen y peso )

$a_i$ : tamaño del pedido del cliente i

$c_{ij}$ : costo de transportar del punto i al j.

El problema a resolver es:

*Diseñar* las rutas a seguir por los vehículos de forma tal que se cumplan un conjunto de restricciones y minimizando en lo posible una medida de efectividad (generalmente costo o distancia recorrida) (Brito, 1994), (Corominas, 1991), (Martínez, 1982), (Pena, 1995), (Pradena, 1997) y (Santos, 1993).

Para resolver este tipo de problema se identifican tres generaciones de algoritmos:

- Algoritmos de primera generación: métodos heurísticos, el algoritmo representativo es el Clarke and Wright, que ha perdurado por su flexibilidad para considerar restricciones de diversa naturaleza.
- Algoritmos de segunda generación: se caracterizan por la aplicación de la programación matemática para desarrollar métodos de solución, mediante la utilización de modelos.
- Algoritmos de tercera generación: se centran en la utilización de algoritmos "robustos", la aplicación de la inteligencia artificial, entre otros.

Todos estos algoritmos desarrollados hasta el momento no consideran el carácter multiobjetivo que se desprende del planteamiento del problema: **minimizar el costo o distancia o tiempo, maximizando el nivel de satisfacción del cliente.**

Según los criterios de las autoras (Garza, 1997), y de acuerdo al planteamiento del diseño de rutas de distribución, el mismo se puede considerar como un problema de optimización multiobjetivo bajo certeza. Los métodos que se presentan en la bibliografía (Romero, 1993, 1997), (Díez de Castro, 1997), (Steuer, 1986) (Baker, 1993), (Barba-Romero, 1997), (Caballero, 1997), (Aguilera, 1996), (Fernández, 2000) para resolver la

optimización multiobjetivo presentan las mismas limitaciones que los métodos clásicos de optimización, pues de hecho no son más que técnicas basadas en estos métodos, es decir generan problemas NP completos, lo que ha motivado que en ocasiones sea necesario utilizar un enfoque de solución basado en la creación de un conjunto de alternativas no dominadas y luego aplicarles a este nuevo conjunto, técnicas multicriterios en espacios discretos o multiatributo, las cuales se identifican con problemas donde el número de alternativas a considerar es finito y normalmente no muy elevado, al convertir el conjunto de alternativas infinitas en un número limitado de ellas y dentro de éste realizar el proceso de selección con la ayuda de los criterios que se desean considerar y las preferencias del decisor. Este procedimiento fue el seleccionado por las autoras para resolver la problemática del diseño de rutas de distribución con enfoque multicriterio (Garza, 1997).

Los atributos seleccionados que caracterizan un problema de ruteo son: costo, calidad y tiempo.

Para evaluar estos atributos se han definido un conjunto de indicadores que permitirán medir el comportamiento de los mismos. Estos indicadores son: costo total de la distribución, coeficiente de ponderación de calidad y tiempo medio de brindar el servicio.

Los mismos pueden obtenerse a partir de utilizar técnicas de expertos, encuestas a clientes o el Benchmarking o utilizar los que la empresa tiene definidos.

En la Tabla 1 se muestran los indicadores generales que pueden ser utilizados para evaluar cada uno de los tres criterios.

**Tabla1.** Indicadores a utilizar para evaluar los atributos en el problema de ruteo.

Atributo	Indicador
Costo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de combustible.</li> <li>• Costo de lubricante.</li> <li>• Costo de desgaste de piezas.</li> <li>• Costo de salario.</li> <li>• Costo de facturación.</li> <li>• Costo de documentación.</li> </ul>
Calidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pedidos entregados en tiempo.</li> <li>• Pedidos servidos.</li> </ul>
Tiempo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duración del ciclo aceptación – entrega.</li> <li>• Tiempo de respuesta a las demandas del cliente.</li> </ul>

La calidad del servicio de distribución se evalúa a través del coeficiente de ponderación de calidad. El valor de este coeficiente se obtiene de la expresión:

$$C_k = \sum_{i=1}^n Q_i * K_i / \sum_{i=1}^n K_i \quad (\text{Espinoza, 1986})$$

donde:

$C_k$ : índice ponderado del nivel de satisfacción.

$K_i$ : coeficiente de ponderación para el indicador  $i$  (importancia del indicador  $i$ ).

$Q_i$ : valor del indicador de calidad  $i$ .

$n$ : cantidad de indicadores.

Los intervalos de  $C_k$  que corresponden a cada evaluación se obtienen de la aplicación de técnicas de trabajo en grupo o técnicas de experto para hacer corresponder la opinión de personalidades de reconocido prestigio internacional y nacional en el tema de Gestión de la Calidad. Los intervalos obtenidos se pueden ver en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Rango de  $C_k$  para evaluar la satisfacción del cliente.

Rango $C_k$	Evaluación del cliente
1 – 0.97	CS
0.96 – 0.88	LS
0.87 – 0.70	PS
Menos de 0.70	CI

CS: cliente satisfecho

LS: cliente parcialmente satisfecho

PS: cliente poco satisfecho

CI: cliente insatisfecho.

El valor de este coeficiente de ponderación se obtiene considerando cada uno de los indicadores definidos para evaluar la calidad del servicio de distribución.

En la solución de problemas de decisión multicriteriales se puede utilizar tanto la filosofía de la escuela normativa de la decisión como la de la escuela descriptiva.

En este trabajo, se propone un método desarrollado por los autores, el cual utiliza un enfoque similar al de los métodos ELECTRE (Roy, 1990), los cuales se consideran una filosofía que implementa el concepto de relación "outranking" o de superioridad, desarrollada por la escuela descriptiva de la decisión, pudiéndose considerar la filosofía más relevante de dicha escuela (Roy, 1996), (Ostanello, 1984).

Esta filosofía se estructura en dos fases:

- Fase 1: Construcción de la relación outranking
- Fase 2: Explotación de la relación outranking

La fase 1 establece el cumplimiento de dos test: test de concordancia y el test de veto (discordancia), para que la afirmación  $a \text{ supera } a b$  sea verdadera, deben pasarse satisfactoriamente ambos test.

La forma de establecer la relación de superioridad ha condicionado el surgimiento de diferentes métodos dentro de la filosofía ELECTRE de los que se conocen sus versiones I, II, III, IV, IS y TRI todos asumen la existencia de dos fases.

En este trabajo se utiliza un enfoque del ELECTRE IV, (el cual permite seleccionar la mejor alternativa sin la utilización de los pesos pues funciona por una secuencia de relaciones de superioridad (outranking)), debido a que se conocen los criterios a considerar, pero no se pudo obtener información de los especialistas acerca de la ponderación o importancia que cada uno de ellos, el mismo plantea una forma particular de realizar la construcción de la relación outranking, definiéndose un test de veto y un test de concordancia propios para el problema de ruteo el cual incluye los criterios: costo, calidad y tiempo.

### 3. MÉTODO PROPUESTO

Utilizando la filosofía de los métodos ELECTRE, se diseña un método que permita obtener la "mejor alternativa" de distribución, teniendo en consideración los atributos definidos. En este procedimiento la diferencia fundamental que existe con el ELECTRE IV es la forma de construcción de la relación outranking, siendo particular para este tipo de problema.

#### Fase 1: Modelo de la relación outranking

Sin pérdida de generalidad para el problema de rutas de distribución, para cualquier par de acciones  $(a, b) \in A$ , se establecen las siguientes condiciones de veto y de concordancia.

### Condiciones de veto

Si

$$\text{NCI}(a) > \text{NCI}(b) \Rightarrow a \text{ nS } b$$

$$\text{NPS}(a) > \text{NPS}(b) + V_{ps} \Rightarrow a \text{ nS } b$$

$$\text{NLS}(a) > \text{NLS}(b) + V_{ls} \Rightarrow a \text{ nS } b$$

donde:

NCI (i): número de clientes insatisfechos en la alternativa i.

NPS (i): número de clientes poco satisfechos en la alternativa i.

NLS (i): número de clientes parcialmente satisfechos en la alternativa i.

$V_{ps}$ : umbral de preferencia para el nivel de satisfacción NPS.

$V_{ls}$ : umbral de preferencia para el nivel de satisfacción NLS.

$a \text{ nS } b$ : la alternativa "a no supera a la b" o la alternativa "a no es mejor que la b" o la alternativa "a no domina a la b".

$$\exists n \text{ tal que } 1ps \text{ es } \approx \text{ nls} \Rightarrow V_{ls} \cong nV_{ps}$$

### Condiciones de Concordancia

Una vez comprobadas las condiciones de veto para todo par de alternativas (a, b) que incumpla las condiciones de veto y por tanto  $\Rightarrow a \text{ S } b$  (la alternativa "a domina o supera a la b"), se pasa a comprobar las condiciones de concordancia, debiéndose cumplir al menos una de estas condiciones:

Si

- |   |   |  |
|---|---|--|
| <p>1 NCI(a) &lt; NCI(b)</p> <p>·</p> <p>3 NCI(a) = NCI(b)</p> <p>· C(a) &lt; C(b) - <math>\beta</math></p> <p>· NLS(a) &lt; NLS(b)</p> <p>· TMS(a) &lt; TMS(b) - <math>\lambda</math></p> | o | <p>2. NCI(a) = NCI(b)</p> <p>NPS(a) &lt; NPS(b)</p> <p>4. NCI(a) = NCI(b)</p> <p>NPS(a) = NPS(b)</p> <p>NLS(a) &lt; NLS(b)</p> <p>C(a) <math>\leq</math> C(b) + <math>\epsilon</math></p> <p>TMS(a) <math>\leq</math> TMS(b) + <math>\sigma</math></p> |
| o   |   |  |
| <p>5 NCI(a) = NCI(b)</p> <p>· NPS(a) = NPS(b)</p> <p>· NLS(a) = NLS(b)</p> <p>C(a) <math>\leq</math> C(b)</p> <p>TMS(a) <math>\leq</math> TMS(b)</p>                                      |   |  |

donde:

$\beta$ : umbral de preferencia significativa para el costo

$\lambda$ : umbral de preferencia significativa para el tiempo

$\epsilon$ : umbral de indiferencia para el costo

$\sigma$ : umbral de indiferencia para el tiempo

C(a), C(b): costos de la alternativa a y b

TMS: tiempo medio de brindar el servicio

Diremos que  $a \text{ S } b$ , es decir la alternativa a es *al menos tan buena como b* o la alternativa a supera a la b de cumplir al menos una de las condiciones de concordancia.

## Fase II. Explotación de la relación outranking

Para resolver esta fase en el diseño de rutas de distribución proponemos utilizar un enfoque similar al de ELECTRE II y Edipo (Fernández, 1997), basado en los conceptos de fuerza y debilidad.

Sea  $F(a)$ : la fuerza de la alternativa  $a$ , el número de  $b \in A$  tales que  $a S b$

$$F(a) = \text{card}^* \{b \in A / a S b\}$$

Sea  $D(a)$ : la debilidad de la alternativa  $a$ , el número de  $b \in A$  tales que  $b S a$ .

$$D(a) = \text{card} \{b \in A / b S a\}$$

Sea  $I(a)$ : el índice de calidad de la alternativa  $a$ , la diferencia entre su fuerza y su debilidad.

$$I(a) = F(a) - D(a)$$

Por lo que, para cada alternativa  $a \in A$ , calcular,  $F(a)$ ,  $D(a)$  y  $I(a)$ .

El ordenamiento de las alternativas se realiza utilizando, el índice de calidad de las alternativas y la relación de superioridad de las mismas, como se muestra a continuación.

Si:	$a S b$	y	$b n S a$	y	$I(a) > I(b) \Rightarrow a P b$
					$I(a) = I(b) \Rightarrow a P b$
					$I(a) < I(b) \Rightarrow *$
	$a S b$	y	$b S a$	y	$I(a) > I(b) \Rightarrow a P b$
					$I(a) = I(b) \Rightarrow a I b$
					$I(a) < I(b) \Rightarrow b P a$
	$a n S b$	y	$n S a$	y	$I(a) > I(b) \Rightarrow a P b$
					$I(a) < I(b) \Rightarrow b P a$
					$I(a) = I(b) \Rightarrow *$

Las condiciones marcadas con \* significan que no existe la información suficiente para poder ordenar las alternativas que las cumplen, lo que significa que son incomparables, debiendo buscar un método que permita eliminar o minimizar estas incomparabilidades.

A continuación exponemos un esquema de la metodología propuesta (Garza, 1997) para resolver un problema de rutas de distribución con enfoque multicriterio, la cual incluye los aspectos descritos anteriormente:

## 4. CONCLUSIONES

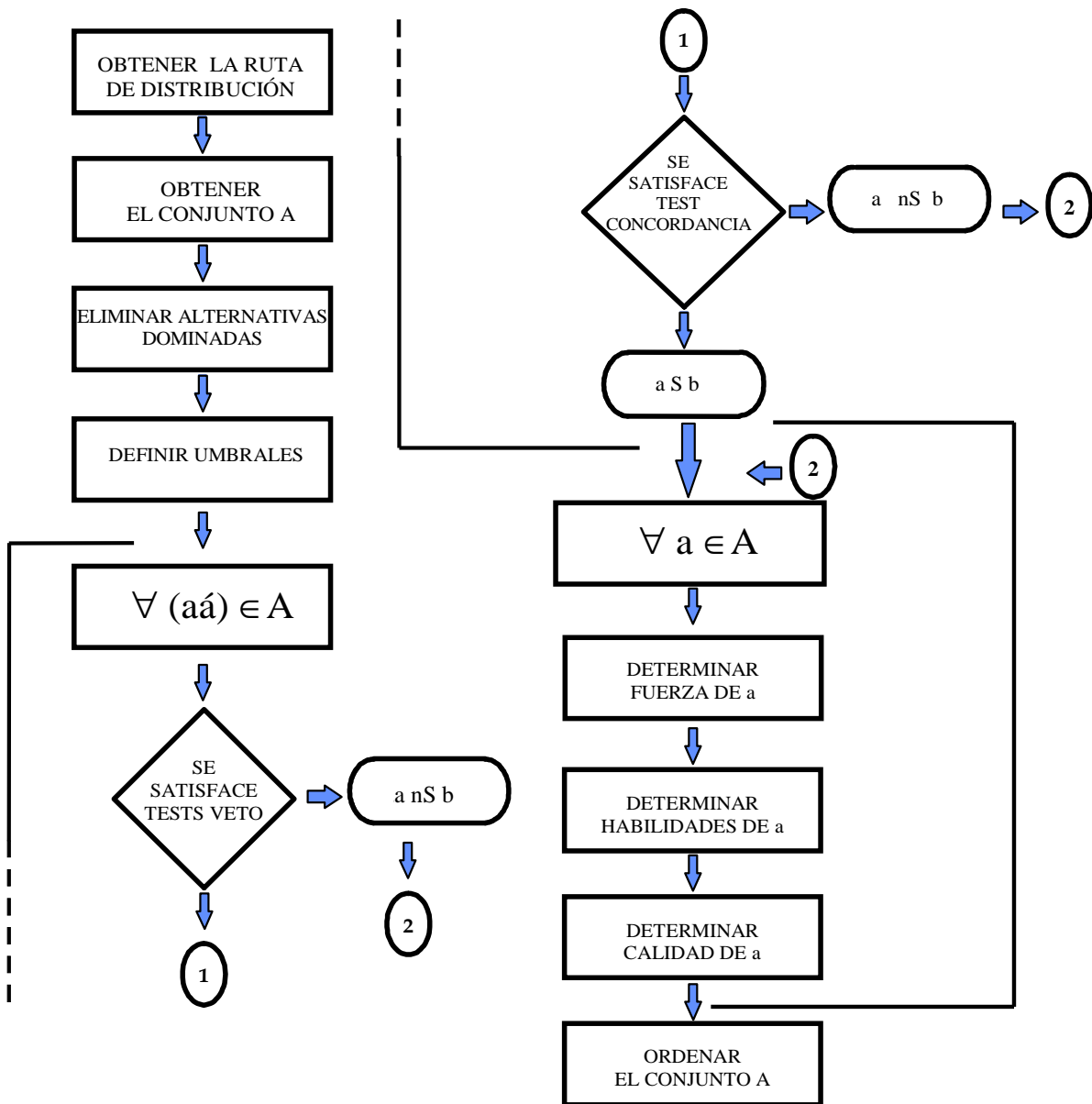
El enfoque presentado en el presente trabajo es el primer intento en Cuba de tratar el problema de distribución de mercancías como un problema de decisión en presencia de múltiples atributos.

El enfoque multiatributo introduce un tratamiento más flexible del sistema de restricciones.

Las condiciones de veto presentadas para darle solución al problema de rutas de distribución elimina una de las deficiencias de los métodos ELECTRE tradicionales (la modelación del veto es insuficiente pues no está influido por el estado de los otros criterios).

---

\*card(cardinal) se dice de los números enteros que sirven para contar las cosas Diccionario PAL - LAS.



## REFERENCIAS

- AGUILERA, D. (1996): "Sistema MONOLITH para la optimización no lineal", Tesis para optar por el título de Master en Informática Aplicada, Ciudad de La Habana.
- BAKER, K.; A. CURRIE and K. NICHOLS (1993): "Multiple Objective Optimization in a Behavioural Synthesis", **IEE Proceedings** 6.
- BARBA ROMERO, S. and J.C. POMEROL (1997): **Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica**, Universidad de Alcalá, España.
- BRITO, B.; O. PRIETO and L. SOUCHAY (1994): "Sistema para la Ayuda al Diseño de Rutas de Distribución", Proyecto fin de carrera, La Habana.
- CABALLERO, R. and F. RUIZ (1997): **Advances in multiple objective and goal programming**, Springer Verlag, Berlín
- COROMINAS, A. and R. COMPANY (1991): " El problema del Diseño de Rutas", **Revista CIM** 22, 20-25, Editora CETISA.

- DÍEZ DE CASTRO, J.A. **et al.** (1997): Ayuda a la decisión: Un nuevo instrumento de gestión. Monografía de la Universidad de Santiago de Compostela, España
- ESPINOSA, N. **et al.** (1986): Dirección de La Calidad, ENPES, Cuba.
- FERNÁNDEZ, E. y R. TORRENS (1997): "El método EDIPO para la ayuda a la decisión multicriterio", **OPIICSA Tecnología, Ciencia y Cultura**, III(19), 25-30, México.
- FERNÁNDEZ, E. y J.C. LEYVA (2000): "A method based on multiobjective optimization for improving the quality of the final ranking derived from a fuzzy preference relation", **Revista Foundations of Computing and Decision Sciences**.
- GARZA, R. (1997): "Un enfoque multicriterio al diseño de rutas de distribución", Tesis para optar por el grado de Maestro en Ciencias, La Habana.
- LÓPEZ, F. (1998): "Formulación y análisis del problema de la planificación física en redes heterogéneas de distribución", Tesis para optar por el Grado de Doctor en Ciencias Técnicas, La Habana.
- MARTÍNEZ, R. (1982): "Encuesta sobre el problema de itinerario de vehículos", Ingeniería Industrial, III(2), 203-216.
- OSTANELLO, A. (1984): "Outranking methods", **Proceeding of the First Summer School on MCDM**, Sicilia.
- PENA, A. (1995): "Sistema Automatizado para el diseño de itinerarios de vehículos", Proyecto Fin de carrera, La Habana.
- PRADENA, L. (1997): "Algoritmos genéticos para el problema de ruteo de vehículos", **4ta. Escuela Latinoamericana de verano de Investigación de Operaciones**.
- ROMERO, C. (1993): Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones. Alianza Editorial S. A. Madrid.
- \_\_\_\_\_ (1997): Análisis de las decisiones multicriterio. Editorial Díaz de Santos, Madrid.
- ROY, B.V. (1990): "The outranking approach and the foundation of ELECTRE methods" en **Reading in Multiple Criteria Decision Aid**, Springer Verlag, Berlin.
- \_\_\_\_\_ (1996): "Multicriteria methodology for Decision Aiding", Klumer Academic Publisher, Boston.
- SANTOS, L. (1993): "Implantación de un Sistema Informático de Planificación de Rutas de Reparto en una Empresa de Almacenaje y Distribución", Proyecto fin de carrera, Madrid.
- STEUER, R.E. (1986): **Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application**, Wiley.& Sons, New York.